

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE ADOBE

Humberto Varum¹, Cristina Oliveira², Dora Silveira³, António Figueiredo⁴, Aníbal Costa⁵, Henrique Pereira⁶, João Almeida⁷

Resumo

A terra tem sido usada como material de construção desde tempos imemoriais até ao presente devido às suas qualidades, como métodos de construção simples e conforto interior elevado. Actualmente, um terço da população vive em habitações feitas de terra, devido a razões culturais, climáticas e económicas. Uma grande percentagem destes edifícios está associado a populações rurais com baixos recursos económicos. Existe um grande património arquitectónico, principalmente em países em desenvolvimento, que deve ser preservado. Dos locais e monumentos classificados como “World Heritage”, 10% são construídos em parte ou completamente em terra, e 16% destes estão classificados como património em risco.

Em Portugal, o adobe foi, até muito recentemente, um material de construção comum. Particularmente na região da Beira Litoral, no centro de Portugal, é possível encontrar construções de adobe em quase todos os tipos de edifícios, em zonas rurais e urbanas. Na cidade de Aveiro, aproximadamente 25% dos edifícios foram construídos em adobe, enquanto no distrito de Aveiro, estima-se que 40% dos edifícios são de adobe. Em Aveiro, há numerosos exemplos de edifícios com reconhecido valor cultural, histórico e arquitectónico, nomeadamente os edifícios no estilo “Art Nouveau”. Apesar disto, tem-se vindo a observar uma perda geral do conhecimento tradicional. Por outro lado, pouca atenção tem sido dada ao estudo e conservação deste património histórico. Como consequência, muitos dos edifícios de adobe existentes apresentam várias anomalias e deficiências estruturais e não estruturais.

A Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver vários estudos de construções de adobe, com investigação desenvolvida na caracterização mecânica do material, estudos experimentais do comportamento estrutural de paredes e arcos de alvenaria de adobe.

¹ Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Com trabalhos sobre construção em adobe, tem organizado várias conferências, workshops. Estuda também avaliação, reabilitação e reforço de estruturas.
hvarum@ua.pt, Universidade de Aveiro, Portugal

² Doutorada em Engenharia Civil, Investigadora de Pós-Doutoramento na Universidade de Aveiro. Tem desenvolvido investigação em reforço sísmico de construções de adobe.
cferreiraoliveira@ua.pt, Universidade de Aveiro, Portugal

³ Aluna de Doutoramento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Os seus interesses de investigação são avaliação, reabilitação e reforço de estruturas existentes, principalmente de construções tradicionais de adobe.
dora.silveira@ua.pt, Universidade de Aveiro, Portugal

⁴ Engenheiro Civil, investigador na Universidade de Aveiro. Os seus interesses de investigação estão associados à caracterização experimental do comportamento estrutural de estruturas de adobe.
ajfigueiredo@ua.pt, Universidade de Aveiro, Portugal

⁵ Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Os seus interesses de investigação são a avaliação, reabilitação e reforço de estruturas existentes; e engenharia sísmica.
agc@ua.pt, Universidade de Aveiro, Portugal

⁶ Engenheiro Civil, Universidade de Aveiro. Os seus interesses de investigação estão associados à caracterização e reabilitação das construções de adobe.
henrique.pereira@ua.pt, Universidade de Aveiro,

⁷ Engenheiro Civil, Universidade de Aveiro. Os seus interesses de investigação estão associados à caracterização e reabilitação das construções de adobe.
japp.almeida@gmail.com, Universidade de Aveiro, Portugal

As estruturas de adobe apresentam características muito apelativas relativamente a uma construção mais sustentável com preservação dos recursos naturais. Contudo, quando sujeitas a acções horizontais, como os sismos, estas construções poderão sofrer danos estruturais graves e mesmo o seu colapso total.

Este artigo apresenta resultados da investigação recentemente realizada na Universidade de Aveiro relativamente à caracterização mecânica de blocos de adobe e ao comportamento estrutural de paredes de adobe à escala real sujeitas a acções horizontais. Além disso, os resultados obtidos em ensaios de paredes de adobe reforçadas serão também discutidos.

Palavras Chave: estruturas de adobe, propriedades mecânicas, reforço

INTRODUÇÃO

A construção em terra tem sido largamente utilizada ao longo da história devido às qualidades que apresenta, quer na facilidade de edificação, quer no conforto interior. Efectivamente, a terra é um material de construção que apresenta muitas características atractivas: possui custo reduzido, encontra-se disponível localmente, é reciclável, apresenta boas propriedades térmicas e acústicas, e encontra-se associada a métodos construtivos simples que requerem apenas um pequeno consumo de energia. A utilização deste material permite uma construção mais sustentável, com preservação dos recursos naturais. No entanto, este material apresenta baixa resistência à tracção e comportamento frágil, manifestando um comportamento deficiente quando sujeita a acções horizontais, se não efectivamente reforçada.

Estima-se que cerca de 30% da população mundial viva em edifícios de terra, e que cerca de 50% da população dos países em desenvolvimento, incluindo a maioria da população rural e pelo menos 20% da população urbana e urbana marginal, vive em edificações construídas em terra [Houben, H., Guillaud, H. (1994)]. Além disso, uma grande parte da construção em terra em países em desenvolvimento encontra-se em zonas de risco sísmico considerável. Vários sismos recentes que afectaram a construção em terra evidenciam a vulnerabilidade sísmica associada a este tipo de construção quando não é devidamente reforçada ([Webster, F., Tolles, E. (2000)], [Ocola, L., Huaco, P. (2005)], [Langenbach, R. (2005)]).

Num passado recente, a terra foi um material de construção muito utilizado em Portugal, tendo sido aplicada principalmente no Algarve, Alentejo e Beira Litoral, até meados do século XX. A produção e utilização do adobe, em particular, desenvolveu-se industrialmente a norte do rio Mondego, principalmente no distrito de Aveiro, devido às boas características das matérias-primas existentes [Santiago, L. (2005)].

Presentemente, cerca de 25% dos edifícios existentes na cidade de Aveiro são de adobe, estimando-se em 40% para todo o distrito. A importante expressividade deste sistema construtivo tem sido confirmada em levantamentos de edificado realizados recentemente ([Silva, S. et al. (2010)], [Silveira, D. (2010)]). O adobe pode ser encontrado em vários tipos de construção: edifícios rurais e urbanos, muitos dos quais são ainda habitados, muros, poços de água, igrejas e armazéns (Figura 1). Vários dos edifícios urbanos em adobe têm associado um importante valor arquitectónico, cultural e histórico, destacando-se os de estilo Arte Nova, uma expressão única em adobe no mundo.

Hoje em dia, uma percentagem elevada destes edifícios encontra-se em mau estado de conservação, devido a falta de manutenção e utilização de técnicas de reabilitação inadequadas. Aveiro é uma região de risco sísmico moderado, o que deve ser tido em conta na reabilitação de estruturas de adobe. Assim, este vasto parque construído não se encontra adequadamente reforçado para resistir à acção sísmica, nem devidamente

conservado e adaptado às actuais exigências, sofrendo de anomalias estruturais e não estruturais de vários tipos.

De modo a dotar as construções em terra de uma resistência adequada, é necessário complementar a utilização de materiais tradicionais com técnicas de reforço inovadoras, permitindo a redução da vulnerabilidade sísmica destas construções. A perda do saber das técnicas tradicionais e a falta de conhecimento de técnicas de reforço impõem mais investigação e desenvolvimento sobre o tema.



Figura 1 - Exemplos de construções em adobe existentes no distrito de Aveiro

Têm sido realizados alguns trabalhos de investigação para a caracterização dinâmica das construções em adobe e na procura de soluções de reforço adequadas para edifícios em terra, nomeadamente no Peru [Blondet, M., Torrelva, D., Villa Garcia, G. (2002)], país com importante tradição de construção com terra e, simultaneamente, com grande perigosidade sísmica. Em Portugal, a Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver estudos ([Varum, H. et al. (2011)], [Arêde et al. (2007)], [Silveira et al.; (2007)], [Varum et al.; (2008)], [Varum et al.; (2005)]) para colmatar as lacunas de informação, relativamente às propriedades estruturais do adobe e os seus materiais constituintes, como composição, resistência e rigidez, ductilidade, capacidade de dissipação e mecanismos de colapso.

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BLOCOS DE ADOBE

No Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, foram ensaiados blocos de adobe representativos das diferentes tipologias existentes na região de Aveiro. Os adobes foram recolhidos de 8 muros e 8 casas, em locais distintos. Destes blocos foram extraídos provetes cilíndricos com diâmetro compreendido entre 60 e 95mm, e altura igual ao dobro do diâmetro. Um total de 101 provetes, 51 provenientes de habitações e 50 de muros, foram submetidos a ensaios mecânicos: 83 à compressão simples e 18 à compressão diametral (Figura 2).



Figura 2 - Ensaio à compressão simples e à compressão diametral sobre provetes de adobe

Os resultados médios obtidos por tipo de construção são apresentados na Tabela 1. Os ensaios realizados apresentam uma grande variabilidade de resultados. Para os ensaios de provetes de muros esta variabilidade é, de uma maneira geral, superior à dos ensaios de provetes de casas. Os valores médios de resistência à compressão simples, obtidos por construção, variam entre 0,53MPa e 1,72MPa. Os valores obtidos para a resistência à tracção correspondem a aproximadamente 20% dos valores de resistência à compressão respectiva. O módulo de elasticidade médio, calculado por construção, assume valores entre 51MPa e 448MPa. No que diz respeito à granulometria dos adobes estudados, verifica-se uma clara tendência para que as amostras com maiores fracções de partículas de menores dimensões apresentem valores de resistência à compressão e tracção superiores.

Uma descrição detalhada dos procedimentos e dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos blocos de adobe pode ser encontrada em [Varum, H. (2007)].

Tabela 1 - Resultados dos ensaios sobre provetes de adobe, por tipo de construção.

Tipo de Construção	Designação	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
Muros	W_01	0.75	--	138
	W_02	0.67	0.13	117
	W_04	0.80	0.12	200
	W_05	1.39	0.40	340
	W_06	1.02	--	209
	W_07	0.64	--	94
	W_09	0.85	--	114
	W_10	0.77	--	127
	H_01	1.00	0.13	273
	H_02	0.81	0.19	203
Habitações	H_03	0.61	0.19	97
	H_04	0.53	--	51
	H_05	1.72	--	448
	H_09	0.55	--	87
	H_10	1.57	--	334
	H_11	0.85	--	143

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO ADOBE – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver ensaios experimentais em estruturas de adobe com o objectivo de avaliar o seu comportamento estrutural ([Arêde A. et al. (2007)], [Figueiredo, A. (2009)], [Pereira, H. (2008)], [Silveira, D. et al. (2007)], [Varum, H. et al. (2005)], [Varum, H. et al. (2007)]). Relativamente à acção sísmica, estes ensaios têm permitido reunir um conjunto relevante de recomendações para o reforço e reabilitação de estruturas de adobe.

Foram realizadas campanhas experimentais *in-situ* com vista a caracterizar o comportamento estrutural de construções já edificadas. Referem-se como exemplos a Parede de Fermelã (Figura 3) e a Casa do Paço (Figura 4), ambas na região de Aveiro [Arêde et al. (2007)], casos em que a estrutura iria ser demolida. Com os ensaios realizados, conseguiu-se avaliar o funcionamento global da estrutura com descrição completa do comportamento dos diferentes elementos estruturais e ligações entre eles.



Figura 3 - Ensaios *in-situ*: a) Parede em Fermelã, b) Casa do Paço

A Figura 4 apresenta o esquema de ensaio adoptado. Inicialmente, realizaram-se ensaios dinâmicos não destrutivos para estimar as frequências próprias da estrutura, de modo a caracterizar o seu comportamento dinâmico. Posteriormente, efectuaram-se ensaios cíclicos com imposição de forças horizontais de amplitude crescente até ao colapso. Após cada nível de deslocamentos impostos, a frequência própria foi novamente registada.

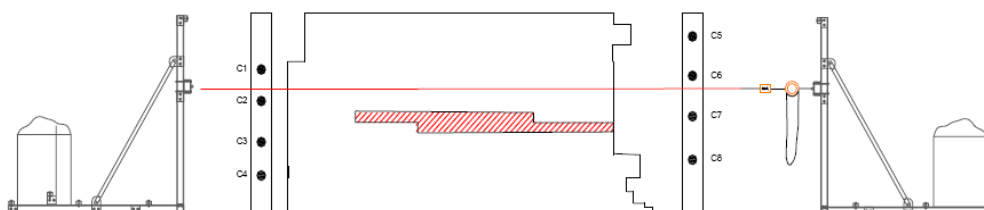


Figura 4 – Esquema de ensaio de parede *in-situ*

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem também realizado ensaios experimentais em laboratório. Na Figura 5 apresenta-se uma parede de adobe com geometria em planta em forma de I, construída à escala real, com dimensões finais de 3,07m de altura, 3,5 m de comprimento e 0,29m de espessura média. Para simular uma edificação representativa do património existente no distrito de Aveiro, foram utilizados

blocos de adobe retirados de uma demolição na região e utilizaram-se técnicas e materiais tradicionais.

O esquema de ensaios realizado foi semelhante ao utilizado para os ensaios *in-situ*, com a condução de ensaios dinâmicos de caracterização do comportamento da parede e, em seguida, a aplicação de forças horizontais cíclicas de amplitude crescente. Além do estudo do comportamento estrutural da parede, foi também considerada e analisada uma solução de reparação e reforço.

Durante a construção da parede apenas materiais tradicionais foram utilizados, pois um dos objectivos era representar adequadamente os edifícios tradicionais de adobe existentes na região. Assim, a solução de reparação deveria considerar componentes com uma boa compatibilidade com estes materiais. Adicionalmente, era desejável que a solução de reparação fosse de baixo custo.



Figura 5 – Parede de adobe: a) construção da parede de adobe (aplicação do reboco); a) aplicação da malha sintética, b) estado final de danos

A solução de reforço incluiu a reparação dos danos da parede com a injeção de uma argamassa à base de cal hidráulica sob pressão nas fissuras existentes, e a aplicação de uma malha sintética em toda a envolvente da parede (Figura 5 b)).

A parede reforçada foi ensaiada repetindo-se o mesmo esquema de ensaios da parede original, com ensaios dinâmicos e ensaios cíclicos com imposição de forças horizontais de amplitude crescente. A Figura 5 c) apresenta o estado final de uma das fachadas da parede.

A máxima capacidade ao corte registada no teste cíclico da parede original foi de 60kPa para um drift de 0,05% no topo da parede. O drift lateral máximo observado foi de 0,61%. Com a solução de reforço apresentada, a máxima capacidade de corte aumentou para 67kPa e o máximo drift imposto foi de 1,6%, ou seja, a capacidade de corte aumentou aproximadamente 10% e o deslocamento máximo foi mais do dobro do aplicado na parede original. Relativamente à resistência residual no final dos ensaios, na parede original registou-se o valor de 35kPa e na parede reforçada 45kPa.

A análise da redução de resistência após o pico, para a parede original e parede reforçada, revela que a fragilidade observada na parede original foi reduzida de forma significativa com a solução de reforço adoptada, aumentando a sua ductilidade e a capacidade de dissipar energia.

A Figura 6 permite verificar que a reabilitação da parede possibilitou recuperar uma rigidez inicial próxima da parede original não reforçada. A frequência inicial de ambas as paredes, original e reforçada, foi de valor idêntico: 23Hz. A evolução da primeira frequência natural é apresentada na Figura 7 em função do drift máximo imposto. Uma vez que a redução da

rigidez durante os ensaios da parede reforçada é mais suave, a primeira frequência natural desta parede terá também um decréscimo menos abrupto, reforçando o que já foi dito atrás.

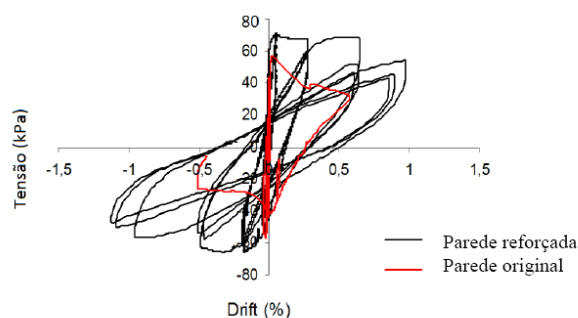


Figura 6 – Tensão vs. drift: comparação entre parede original e reforçada

A solução de reforço utilizada permitiu a melhoria do desempenho da parede reduzindo a sua vulnerabilidade sísmica. Não se observou qualquer rotura frágil, tão característica deste tipo de alvenaria, na parede após o reforço. A capacidade resistente lateral aumentou e registaram-se melhorias significativas na ductilidade e na capacidade de dissipação de energia.

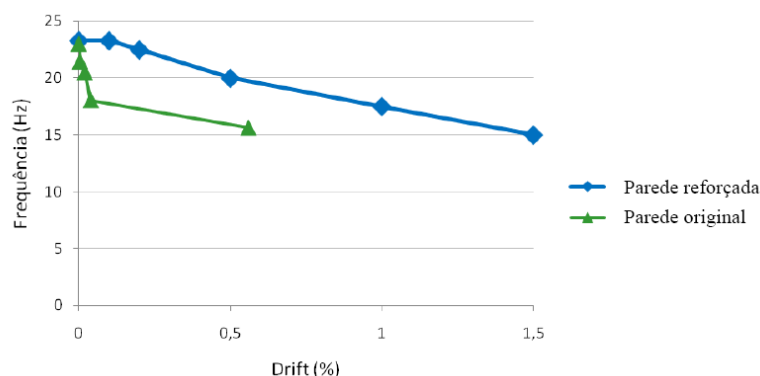


Figura 7 – Evolução da primeira frequência natural nas paredes originais e reforçada

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das características apelativas que apresentam, as construções de adobe apresentam fragilidades estruturais importantes e cuidados especiais na sua manutenção e conservação. As construções de adobe possuem baixa resistência à tracção e comportamento frágil, manifestando um comportamento deficiente quando sujeita a acções horizontais. Uma grande parte do parque edificado na região de Aveiro não se encontra adequadamente reforçado para resistir à acção sísmica, nem devidamente conservado e adaptado às actuais exigências funcionais e de conforto, sofrendo de anomalias estruturais e não estruturais de vários tipos.

O Departamento de Engenharia de Civil da Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver investigação através da realização de ensaios de caracterização mecânica dos adobes existentes na região e ensaios do comportamento estrutural de construções em adobe, *in-situ* e em laboratório, com o objectivo de avaliar a vulnerabilidade sísmica destas estruturas e estudar soluções de reforço. Neste artigo mostram-se os resultados obtidos em ensaios de

caracterização mecânica de blocos de adobe retirados de edificações distintas, muros e habitações. Apresentam-se também ensaios do comportamento estrutural de alvenaria de adobe realizados *in-situ* e em laboratório. Em particular, são exibidos os resultados obtidos no ensaio de uma parede de adobe, construída à escala real, em que se aplicou uma solução de reforço simples, económica e compatível com os materiais tradicionais. A solução de reforço aplicada permitiu melhorar o desempenho estrutural da parede, reduzindo a sua vulnerabilidade sísmica.

A investigação desenvolvida permite acrescentar mais dados e informação importante para o desenvolvimento do conhecimento da alvenaria de adobe e seu reforço. Contudo, é necessária mais investigação de modo a possibilitar análises mais rigorosas da segurança de estruturas de adobe, com maior conhecimento para interpretação das patologias estruturais. O estudo de soluções de reforço é fundamental para que se consiga corrigir as deficiências que estas estruturas apresentam face a forças horizontais cíclicas, como as induzidas pela acção sísmica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os que contribuíram para a realização dos ensaios aqui apresentados, com uma menção especial a:

- Laboratory of Earthquake and Structural Engineering (LESE), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Empresa STAP
- Câmara Municipal de Aveiro
- Departamentos de Física, Mecânica e Geociências da Universidade de Aveiro

BIBLIOGRAFIA

Arêde, A., Costa, A., Varum, H., Vicente, R., Costa, A., Pereira, H., Rodrigues, H. (2007) Avaliação experimental do comportamento fora do plano de paredes de alvenaria de adobe. *Actas do V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Blondet, M., Torrelva, D., Villa Garcia, G. (2002) Adobe in Peru: Tradition, Research and Future. *Proceedings of Modern Earth Building 2002 -International Conference and Fair*, Berlin, Germany.

Castro, A. (2009) O sistema construtivo tradicional em período de transição de linguagens de arquitectura. O Movimento Moderno e o adobe. *Tese de Mestrado*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Figueiredo, A. (2009) Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe. *Tese de Mestrado*, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Houben, H., Guillaud, H. (1994) *Earth Construction - A Comprehensive Guide*. ITDG Publishing, Londres, Reino Unido.

Langenbach, R. (2005) Collapse from the inside-out. The impact of the 2003 Bam, Iran earthquake on the earthen architecture of the Arg-e Bam. *Proceedings of the SismoAdobe2005 Conference* (publicação em CD), Lima, Peru, 16 a 19 de Maio, 2005.

Ocola, L., Huaco, P. (2005) Respuesta sísmica de edificaciones de adobe en el territorio peruano: terremotos 1974-2001. *Proceedings of the SismoAdobe2005 Conference* (publicação em CD), Lima, Peru, 16 a 19 de Maio, 2005.

Pereira, H. (2008) Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe. *Tese de Mestrado*, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Santiago, L. (2005) O areeiro de Manuel Duarte – Esgueira, Aveiro. *Arquitectura de terra em Portugal*, Argumentum, Lisboa, Portugal.

Silva, S., Varum, H., Bastos, D., Silveira, D. (2010) Arquitectura de terra – investigação e caracterização de edificações em adobe no concelho da Murtosa. *Terra em Seminário 2010*. Argumentum, Lisboa, Portugal.

Silveira, D., Varum, H. e Costa, A. (2007) Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: the traditional adobe constructions in Aveiro district. *Sustainable Development III*. WITPress, Editors A. Kungolas, C.A. Brebbia, E. Beriatos - WITPress, ISBN: 978-1-84564-103-0, Vol.s 1 and 2, pp. 705-714, Carvoeiro, Portugal, Vol.s 1 and 2, pp. 705-714, Carvoeiro, Algarve, Abril de 2007.

Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Lima, E. (2010) Levantamento e caracterização do parque edificado em adobe na cidade de Aveiro. *Actas do 6º Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal e 9º Seminário Ibero-Americano de Construção e Arquitectura com Terra* (publicação em CD), Coimbra, Portugal, 20 a 23 de Fevereiro de 2010.

Varum, H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T., Costa, A. (2011), Investigaciones realizadas en la Universidad de Aveiro sobre caracterización mecánica de las construcciones existentes em adobe y propuestas de rehabilitación y refuerzo. Resultados alcanzados. Informes de la Construcción, Vol. 63, 523, 127-142, 2011.

Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., Almeida, J., Silveira, D. (2007) Experimental Characterization of the Mechanical Behaviour of Adobe Bricks of Existing Constructions in Aveiro District. *Proceedings of the 13th Conference of Sociedade Portuguesa de Materiais and IV International Materials Symposium – A Materials Science Forum*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.

Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J., Rodrigues, H. (2008) Caracterização do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe. *Revista Mecânica Experimental*, APAET, ISSN 1646-7078, Volume 15, pp. 23-32, 2008.

Varum, H., Costa, A., Silveira, D., Pereira, H., Almeida, J., Martins, T. (2007). Structural Behaviour Assessment and Material Characterization of Traditional Adobe Constructions, *Proceedings of AdobeUSA 2007*, May 18-20, NNMC and Adobe Association of the Southwest, El Rito, NM, USA.

Varum, H., Martins, T., Velosa, A. (2005) Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro. *Actas do IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal*. Convento da Orada. Monsaraz, Portugal.

Webster, F., Tolles, E. (2000) Earthquake damage to historic and older adobe buildings during the 1994 Northridge, California Earthquake. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, Nova Zelândia. 30 de Janeiro a 4 de Fevereiro, 2000.